

Curso: Introdução à Ciência dos Materiais Aplicados à Engenharia Civil

Concreto fresco: influencia do Empacotamento de Partículas e outros fatores

Profa Dra. Mônica Pinto Barbosa



1



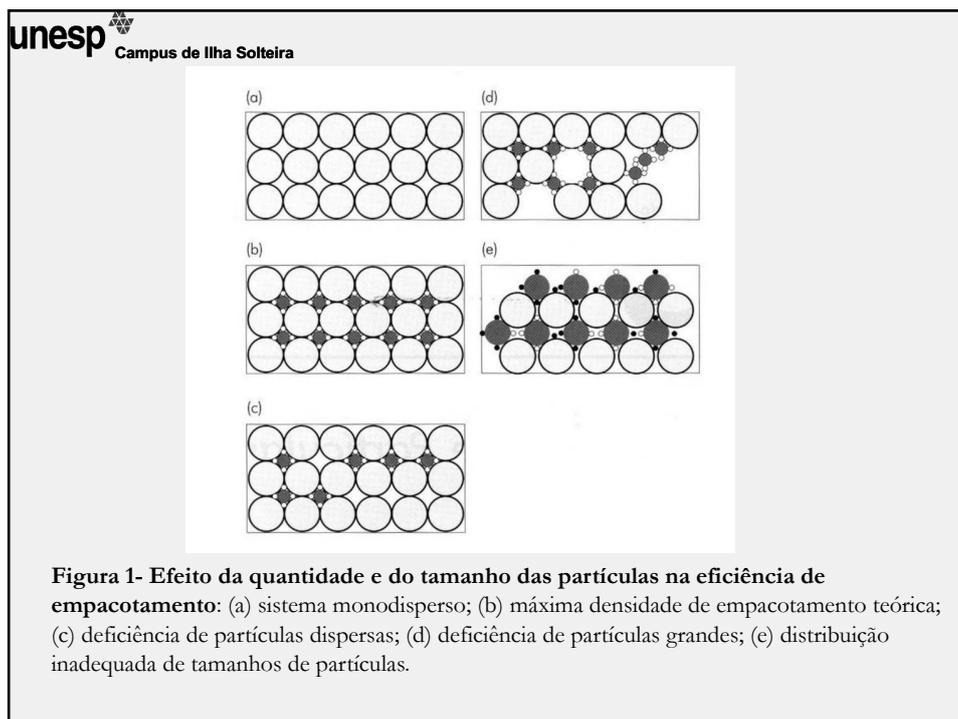
Como definir empacotamento de partículas????

Segundo McGeary o empacotamento pode ser definido como:

“o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”.

Empacotamentos densos são desejáveis na obtenção de concretos, cerâmicas estruturais, eletrônicas, nucleares, além da metalurgia do pó, entre outros exemplos. Empacotamentos de baixa densidade são necessários na produção de revestimentos isolantes térmicos.

2



3

FATORES QUE AFETAM O EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

SEGUNDO PANDOFELLI, O primeiro fator a ser considerado é a *existência de diversas distribuições granulométricas* alterando a condição de dispersão inicial. Com isso, pode-se obter sistemas com fatores de empacotamento elevados – próximos de 1 – até misturas onde esse fator se aproxima do nível das monodispersões,

O segundo fator que pode alterar a condição de empacotamento é a *morfologia das partículas*. Quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois ocorre o atrito entre as partículas a partir do contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica.

4

Terceiro fator: A *porosidade interna das partículas* também altera a densidade de um material. As partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta. Para efeito de distribuição granulométrica, as partículas que apresentam porosidade fechada são semelhantes às densas, mas resultam em misturas com densidade menor. Já as partículas que apresentam porosidade aberta perturbam o empacotamento devido ao seu formato irregular e também resultam em misturas com menores densidades de empacotamento.

A seqüência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a *distribuição granulométrica* do sistema determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão, sendo este o *Quarto fator*. Empacotamentos com menor porosidade podem ser obtidos se os vazios existentes entre as partículas de uma dispersão forem preenchidos por partículas menores que os mesmos. Porém, caso sejam introduzidas partículas maiores que os vazios existentes, essas promoverão o surgimento de novos vazios, levando a um aumento na porosidade e redução da eficiência do empacotamento.

5

Quinto fator: A *granulometria* melhorada do aglomerante e o efeito lubrificante imposto pelas partículas finas possivelmente reduzem o imbricamento entre os agregados e, conseqüentemente, a resistência ao escoamento: quanto mais fino e mais esférico for o material cimentício, maior a redução da resistência ao escoamento. Na presença de sílica ativa, onde mais aditivo torna-se necessário, a resistência ao escoamento será menor. Assim, de acordo com Nehdi, Mindess e Aïtcin (1998), uma determinada granulometria e finura que garantem o empacotamento ótimo das partículas de aglomerantes podem acentuar o escoamento do concreto.

A *quantidade e o tipo de agregado* desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto fresco, em particular para a produção de CAD com baixa relação água/aglomerante, sendo este o *sexto fator*. Os agregados possuem um efeito principal na reologia do concreto, aumentando consideravelmente tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento.

6

Como a morfologia das partículas afeta o empacotamento?

- Morfologia é a forma ou o formato da partícula. Quanto mais afastada do formato esférico for a partícula menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, devido à fricção interparticular que surge pelo contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares maior esse efeito, em função da maior área superficial específica.
- Além do efeito de fricção a irregularidade das formas das partículas pode gerar estruturas que nunca alcançarão um máximo empacotamento, devido a considerações geométricas.

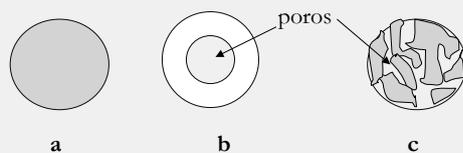
7

E a Porosidade?

As partículas podem ser totalmente densas com porosidade interna fechada ou com porosidade aberta. Para se obter um empacotamento de máxima densidade para uma dada distribuição granulométrica é necessário que se utilizem partículas densas e com a menor porosidade possível.

Entretanto as partículas densas não são as mais usuais. Existem as partículas com porosidade fechada que são similares as densas, mas com relação à densidade produzem uma mistura menos densa e as partículas de porosidade aberta que provocam alteração no empacotamento das mesmas por apresentarem formato irregular, além de possuírem uma maior capacidade de absorção de fases líquidas através dos poros..

8



(a) = partícula densa, isenta de poros.

(b) = partícula com poro interno fechado;

(c) = partícula com poros aberta

E a Densidade?

Se em uma distribuição granulométrica houver uma acentuada diferença de densidade entre seus componentes, o processo de compactação deve ser bastante cauteloso para evitar possíveis segregações. Tal fenômeno pode gerar gradientes de densidade de empacotamento na mistura, o que, do ponto de vista de propriedades do material (concreto) pode levar a diferenças de desempenho.

O que vem a ser EFEITO DE PAREDE???

O efeito de parede diz respeito a obtenção de misturas com elevadas densidades de empacotamento.

9

Terminologia empregada no estudo do empacotamento de partículas

MONODISPERSÃO: partículas de um único tamanho, tanto esféricas como não esféricas. É praticamente impossível produzir uma monodispersão real.

TAMANHOS DISCRETOS: Todas as partículas pertencentes a uma estreita faixa granulométrica, como, por exemplo, entre duas malhas sucessivas de peneiras, ou pertencentes a uma classe única em um analisador de partículas.

POLIDISPERSÕES: é uma mistura de duas ou mais monodispersões ou tamanhos discretos, ou seja constituída por grãos de diversos tamanhos. Uma mistura é dita polidispersa quando ela é composta por duas ou mais classes de grãos.

10

MODALIDADE: o número de monodispersões ou tamanhos discretos em uma polidispersão. Uma mistura com duas monodispersões por exemplo, é denominada bi modal; com três e com mais de três, poli modal.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

DESCONTÍNUA: a faixa de distribuição de tamanhos apresenta intervalos (“gaps”), onde se verifica a ausência de determinados tamanhos de partículas.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CONTÍNUA:

A faixa de distribuição de tamanhos é contínua em toda sua extensão (ausência de “gaps”).

11

EFICIÊNCIA DE EMPACOTAMENTO (P_e): conteúdo de sólido presente em qualquer unidade de volume que o contenha, ou seja, volume realmente ocupado pelas partículas em relação ao volume total do sistema (partículas mais porosidade), sendo o resultado apresentado em porcentagem (%).

FATOR DE EMPACOTAMENTO (P_f): definido como:

$$P_f = P_e/100$$

POROSIDADE (P_o): volume de vazios entre as partículas expresso em fração do volume:

$$P_o = (1 - P_f)$$

12

VOLUME APARENTE (V_{ap}): volume efetivamente ocupado pelas partículas:

$$V_{ap} = \frac{1}{(1 - P_o)} = \frac{1}{P_f}$$

DENSIDADE RELATIVA DE EMPACOTAMENTO (ρ_{emp}): é

Definido como o quociente entre a densidade volumétrica do sistema de partículas (ρ_{bulk}) e a densidade máxima da partícula sólida (ρ_s):

$$\rho_{emp} = \rho_{bulk} / \rho_s$$

Sendo ρ_{bulk} = massa do sólido dividida pelo volume total do sistema (partículas + porosidade)

ρ_s = massa do sólido dividida pelo volume realmente ocupado pelo sólido.

13

Modelos de Empacotamento de Partículas

São eles:

- Modelo de Furnas;
- Modelo de Westman e Hugill;
- Modelo de Andreasen;
- Modelo de Alfred

Modelo de Furnas: É um modelo de *Abordagem Discreta*, ou seja o empacotamento máximo acontece quando as partículas finas preenchem completamente os vazios existentes entre as maiores.

Furnas mostrou que as proporções dos vários tamanhos de partículas envolvidas na elaboração de uma distribuição de máxima densidade de empacotamento formam uma progressão geométrica.

14

$$CPFT = \left[\frac{D_p^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}}{D_L^{\log \bar{r}} - D_s^{\log \bar{r}}} \right] \times 100$$

Onde

CPFT = é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = é o diâmetro da partícula;

D_s = é o diâmetro da menor partícula;

D_L = é o diâmetro da maior partícula;

\bar{r} = é o quociente entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior.

15

Modelo de Andreasen: Também é um modelo de *Abordagem Contínua*, ou seja o empacotamento ideal é aquele em que, em torno de duas partículas específicas com tamanhos muito diferentes, há condições de similaridade, isto é a imagem da granulação de ambos os ambientes deve ser a mesma. Essa condição de similaridade define a distribuição de tamanho de partículas em termos de uma lei de potências:

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \times 100$$

Onde: q é o módulo ou coeficiente da distribuição.

16

Modelo de Alfred: é um aperfeiçoamento dos modelos de Furnas e Andreasen que mostra que na realidade esses modelos podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar uma mesma coisa.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \times 100$$

OBS: Estudos apontam que, pela comparação entre densidades obtidas experimentalmente, a eficiência de empacotamento resultantes das diversas distribuições de máxima densidade estudadas é expressa em:

ALFRED>ANDREASEN>FURNAS

17

Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) ou Modelo de De Larrard

Modele d'Empilement Compressible

Trata-se de um modelo para composição do concreto de altíssimo desempenho, desenvolvido pelo pesquisador francês *de Larrard*, o qual apresenta uma abordagem totalmente diferente dos outros métodos. Sua conceituação baseia-se num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares visando à máxima compacidade possível. Em seguida, faz-se a dosagem a partir da fração volumétrica otimizada dos materiais e adequada às propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

O método de *de Larrard* é estruturado dentro de um quadro teórico científico solidamente estabelecido. Sua eficiência foi comprovada para diferentes tipos de concreto. Com essa formulação, podem ser dosados, dentre outros, concretos de resistência normal, de alto desempenho, com pós-reativos, jateados, auto-adensáveis, compactados a rolo e de diferentes densidades.

18

O MEC divide-se em dois módulos distintos: empacotamento virtual e empacotamento real.

O primeiro módulo, empacotamento virtual, corresponde a um modelo matemático que possibilita a obtenção da máxima compacidade possível de uma mistura granular, que seria obtida empilhando todos os seus grãos um a um.

Já o empacotamento real é obtido por um procedimento físico de compactação dos grãos (vibração, pilonamento, molhagem etc.).

O empacotamento real está correlacionado ao empacotamento virtual por meio de um índice de compactação que caracteriza o procedimento físico de empacotamento.

Os módulos 1 e 2, relacionados através do índice de empacotamento, permitem o cálculo da compacidade real de uma mistura granular, compacidade esta que pode ser otimizada através de um procedimento de otimização.

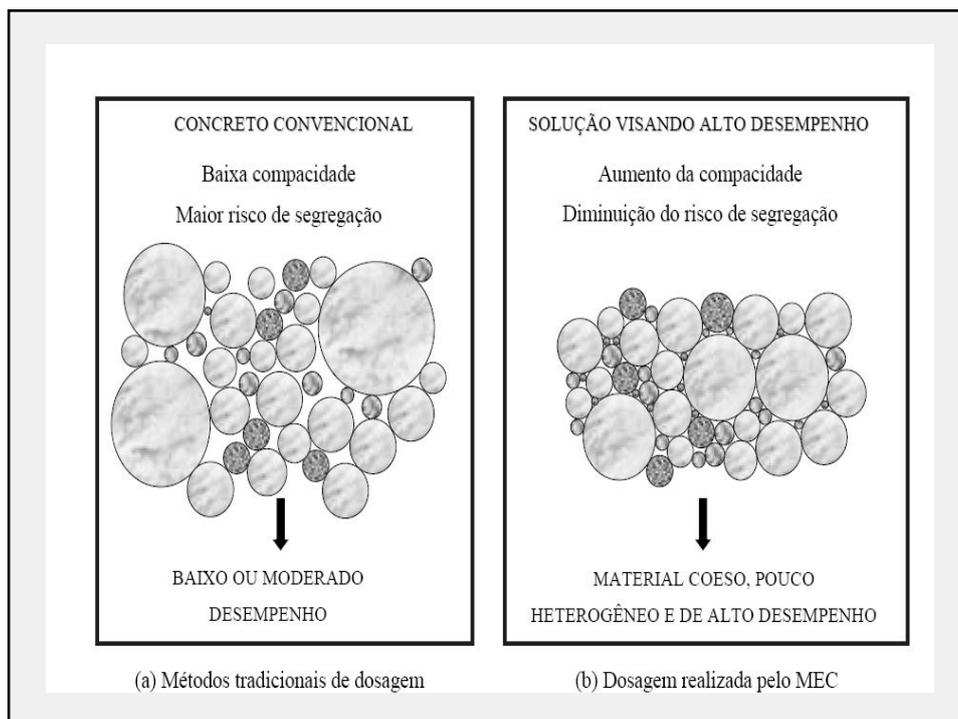
Uma vez obtida a compacidade da mistura granular, o método de *de Larrard* possibilita então a correlação com propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido através de formulações matemáticas validadas experimentalmente.

19

IMPORTÂNCIA:

O método de empacotamento compressível (MEC) surge como uma ferramenta de dosagem que possibilita a seleção e otimização dos constituintes do concreto, aumentando a compacidade da mistura granular e diminuindo o risco de segregação, com objetivo de proporcionar o mais alto desempenho ao produto final que, aliado a baixa relação a / c , torna o concreto coeso e com baixa porosidade

20



21

EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA SOBRE AS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS CONCRETOS.

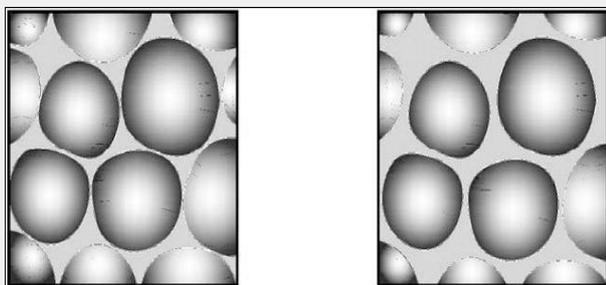
As partículas sólidas presentes em um fluido interferem na movimentação das linhas de fluxo do meio líquido e assim influenciam o comportamento reológico de suspensões, provocando aumento de sua viscosidade e desviando seu comportamento do comportamento newtoniano.

Como podemos visualizar esse efeito???

Para simular o comportamento reológico do concreto no estado fresco, considerado como uma mistura granular suspensa em água, é definido um volume mínimo de água como o volume necessário para preencher os vazios da mistura granular sólida no estado seco.

22

Quando estes vazios são preenchidos pela água, o empacotamento do material é dito denso e praticamente não tem trabalhabilidade, (figura (a)).



(a)

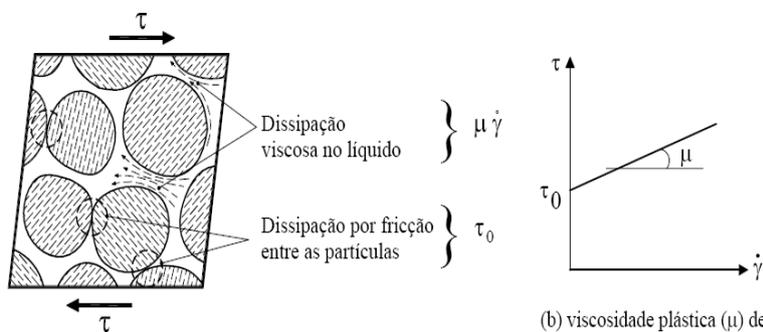
(b)

Figura : Suspensão de grãos: (a) sem trabalhabilidade; (b) com trabalhabilidade.

À medida que a quantidade de água é incrementada, gera-se um afastamento entre os grãos, o que permite o deslizamento entre os mesmos (figura (b)).

23

Ao se aplicar uma tensão de cisalhamento sobre o concreto, uma deformação irá ocorrer superando as forças de fricção e de coesão entre os grãos, figura 3.2.



(a) Contribuição da fase sólida e da fase líquida ao cisalhamento

(b) viscosidade plástica (μ) de acordo com modelo de Bingham

Figura 3.2: Contribuição da fase sólida e da fase líquida para a resistência ao cisalhamento.

Assim o concreto passa a ter trabalhabilidade, que é dependente de um pequeno afastamento entre os grãos, afetando a VISCOSIDADE do concreto.

24

E a Tensão de Cisalhamento?

A tensão de cisalhamento do concreto é fortemente influenciada pela adição de moléculas de dispersante, afetando o mecanismo de aglomeração e dispersão dos materiais finos que compõem a mistura granular. Como a tensão de cisalhamento de um fluido é originada pela coesão e atrito entre os grãos, nas misturas dispersas, as partículas permanecem individualizadas, diminuindo assim a coesão entre elas ao passo que o fluido inicia o escoamento, e o valor de τ_0 será menor do que para misturas não dispersas, onde as partículas aglomeradas se deslocam em conjunto, aumentando a coesão e o travamento entre os aglomerados.

25

Segregação e exsudação

A segregação é definida como a separação dos componentes do concreto fresco de maneira que sua distribuição não seja mais uniforme (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

IMPORTÂNCIA DO TEMA:

Para uma completa abordagem da trabalhabilidade do concreto, deve-se considerar a estabilidade da mistura, isto é, sua capacidade de resistir à segregação e à exsudação. Para isso, é importante que, durante todo o processo de mistura, transporte e lançamento de um concreto, este mantenha uniformidade em sua composição.

26

O concreto fresco quando é lançado, os agregados graúdos mais pesados sedimentam enquanto os elementos mais leves – como o ar incorporado, a água e a argamassa – tendem a subir, resultando em alguns efeitos indesejáveis, tal como a **segregação e a exsudação**.

TIPOS DE SEGREGAÇÃO

Existem dois tipos de segregação:

O primeiro é uma característica das misturas secas, corresponde à separação dos agregados da argamassa do concreto;

O segundo, que é uma característica das misturas muito fluidas, corresponde à exsudação.

E A EXSUDAÇÃO???

27

A exsudação é definida como um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água na superfície do concreto após ele ter sido lançado e adensado, porém antes de ocorrer o início de pega.

COMO ACONTECE???

Ela resulta da incapacidade dos materiais constituintes de uma mistura de concreto em reter toda a água de amassamento em estado disperso enquanto os agregados mais pesados estiverem assentando.

CAUSAS DA SEGREGAÇÃO E DA EXSUDAÇÃO

28

ENTRE AS CAUSAS ESTÃO:

- a combinação de consistência inadequada;
- uma quantidade excessiva de partículas do agregado graúdo com massa específica muito alta ou muito baixa;
- a utilização de partículas com diâmetro máximo maior que 25 mm;
- pouca quantidade de partículas finas;
- uma mudança desfavorável na forma das partículas;
- uma redução do teor de cimento;
- uma mudança no teor de água fazendo com que a mistura se torne muito seca ou muito fluida;
- os métodos impróprios de lançamento e adensamento do material

Segundo Aitcin (2000), a segregação em um CAD pode ser produzida por um aumento acidental da dosagem de SP, ou seja, quando a dosagem estiver muito acima do ponto de saturação de um determinado cimento para a relação água/aglomerante escolhida.

29

COMO REDUZIR OU ELIMINAR ESSES PROBLEMAS???

Através de um maior controle da dosagem e dos métodos de manuseio e lançamento do concreto.

Aumentar a viscosidade de uma mistura melhora sua estabilidade e, conseqüentemente, reduz a segregação. Isso pode ser conseguido reduzindo-se a quantidade de água ou de SP do concreto, pela adição de pozolanas, pelo aumento do teor de cimento, pela adição de um aditivo incorporador de ar ou de aditivos que melhoram a viscosidade do material

O QUE JUSTIFICA ESSE PROCEDIMENTO???

O concreto fresco apresenta uma tensão de escoamento abaixo da qual ele se comporta como um sólido e acima da qual ele flui como um líquido. A presença de uma tensão de escoamento em um meio retarda e pode até evitar a sedimentação natural dos agregados mais pesados. Um sólido pode ou não sedimentar em um meio dependendo do seu tamanho, da magnitude da tensão de escoamento do meio e da diferença de densidade entre o sólido e o meio.

30

No caso do *concreto fresco*, o material apresenta uma tensão de escoamento que, sob determinadas condições, evita a segregação do agregado graúdo, embora sua densidade seja muito maior que a da argamassa.

Sendo assim, a densidade, a tensão de escoamento e a viscosidade de uma matriz pasta de cimento controlam a resistência à segregação para uma determinada distribuição de agregados em um concreto

Uma *tensão de escoamento* e uma *viscosidade mínimas* são necessárias a uma pasta de cimento para evitar a segregação sob condições estática e dinâmica, respectivamente. Porém, os valores exatos desses parâmetros são dependentes da diferença de densidade entre a pasta e o agregado.

Se a tensão de escoamento ou a viscosidade for suficientemente alta, as partículas nunca segregarão; porém, o material também apresentará uma baixa trabalhabilidade.

Assim, existe uma variação crítica para os parâmetros reológicos onde a segregação é minimizada.